

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЛОИ СОВРЕМЕННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

О.А. Быценко<sup>1)</sup>, Е.В. Филонова<sup>1)</sup>, А.Б. Марков<sup>2)</sup>, Н.А. Белова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,  
Государственный научный центр Российской Федерации,  
ул. Радио, 17, Москва, 105005, Россия, oksiwear@yandex.ru

<sup>2)</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Академический пр., 2/3, Томск, 634055, Россия, almar@lve.hcei.tsc.ru

С использованием комплекса металлофизических методов исследования проведены исследования физико-химического и структурно-фазового состояний поверхностного слоя до и после модифицирования с помощью облучения сильноточными электронными пучками образцов с нанесенными на них жаростойкими конденсированными ионно-плазменными покрытиями трех различных композиций по 5-и выбранным режимам при варьировании значениями энергии электронов и числом импульсов.

### Введение

Разработка новых жаропрочных материалов, отвечающих современным требованиям конструкторов авиационных двигателей к наиболее нагруженным деталям, прежде всего к лопаткам и дискам проточной части турбины, является важнейшей задачей авиационного материаловедения [1].

Для успешного решения этой задачи в течение последних лет во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) был создан задел в области разработки материалов для ГТД пятого и шестого поколения. ВИАМ предлагается ряд никелевых сплавов с содержанием рения до 9 масс. % и новых ионно-плазменных покрытий. Однако остается необходимость в повышении жаростойкости и эрозионной стойкости имеющихся покрытий. Поэтому другой актуальной задачей авиационного двигателестроения является развитие наиболее прогрессивных методов инженерии поверхности деталей, изготовленных из жаропрочных сплавов, особенно из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС [2]. Разработка и совершенствование методов поверхностной инженерии с использованием концентрированных импульсных потоков энергии (КИПЭ) имеет ряд преимуществ перед классическими методами поверхностной механической, химической и термомеханической обработок: формирование уникального физико-химического состояния материала поверхностного слоя; достижение рекордных точности изготовления и шероховатости поверхности [3, 4].

Исследование влияния режимов облучения СИЭП наносимых покрытий NiCrAlY различных композиций на поверхность облученных мишеней из жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ являлось основной целью данной публикации.

### Материалы и методики исследования

Исследования проводили на образцах из жаропрочного никелевого сплава ЖС 36 с нанесенными ионно-плазменными конденсированными покрытиями 3-х различных композиций: 1-ая ком-

позиция - ВСДП-4 (5-8% Cr - 11-13%Al - 0,5-1%Нf, Ni-основа) + ВСДП-16 (13-16% Ni - 1,8% Y, Al - основа); 2-ая композиция СДП-2 (18-22% Cr - 11-13%Al- 0,2-0,5%Y, Ni-основа) +ВСДП-16(13-16% Ni - 1,8% Y, Al -основа); 3-ая композиция ВСДП-3(18-22% Cr - 11-13%Al - 0,5–0,8% Re - 0,2-0,5% Y - 0,7-0,9% Hf, Ni-основа)+ВСДП-16(13-16% Ni - 1,8% Y, Al -основа). После нанесения покрытия образцы подвергали стандартной термической обработке: диффузионному отжигу при температуре 1050°C в течение 2 ч в вакууме.

Облучение проводили на комплексной автоматизированной электронно-пучковой установке «РИТМ-СП».

Шероховатость определяли при помощи конфокального сканирующего лазерного микроскопа LextOLS310. Оценку остаточных напряжений (ОН), проводили на анализаторе PSF-3M «RIGAKU» в излучении CrK<sub>α</sub>.

Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе LeicaDmlRM, исследование элементного состава поверхностных слоев покрытия до и после облучения – на сканирующем растровом электронном микроскопе ZEISSEVOMA 10 с помощью энергодисперсионной приставки.

Оценку микротвердости проводили на микротвердомере Durascan-70.

### Экспериментальные данные и их обсуждение

Наибольший практический интерес представляет вторая из предлагаемых композиций, так как именно данная композиция более известная и апробированная для ответственных деталей ГТД (рабочая лопатка ТВД). Данное покрытие имеет достаточно высокий уровень жаростойкости и, используя возможности модифицирования поверхностного слоя покрытия, позволит не только увеличить жаростойкость, но коррозионную и эрозионную стойкость, что в последствии может повысить рабочую температуру лопаток ТВД. Для образцов с покрытием СДП2+ВСДП16 были дополнительно выбраны еще три режима: E=30 кэВ,

10 импульсов (режим 3);  $E=25$  кэВ, 10 импульсов (режим 4);  $E=20$  кэВ, 10 импульсов (режим 5).

В результате проведенных исследований были получены следующие научные результаты.

При исследовании микроструктуры выбранных покрытий до и после облучения сильноточными электронными пучками микросекундной длительности по режимам 1 и 2 было выявлено значительное снижение шероховатости поверхности образцов, причем для образцов композиций 1 (ВСП4+ВСП16) шероховатость снизилась в 2.0 раза, для композиций 2 (СДП2+ВСП16) - в 2.2 раза, а для образцов, имеющих покрытие композиции 3 (ВСП3+ВСП16) снижение шероховатости произошло в 1.7 раза. На основании полученных результатов можно сделать предварительный вывод, что изменение шероховатости поверхности образцов может быть также связано с элементарным составом и структурно-фазовым состоянием покрытий до облучения (табл. 1).

Таблица 1. Значения шероховатости поверхности исследуемых образцов

№ образца	Среднее арифметическое отклонение профиля $R_a$ , мкм		Максимальная высота неровности профиля по десяти точкам $R_z$ , мкм	
	до облучения	после облучения	до облучения	после облучения
32	2.76	1.31	27.5	17.7
33	2.11	1.17	23.33	15.91
38	2.94	1.88	27.61	17.89
39	2.81	1.25	24.58	16.68
47	2.60	1.66	22.33	15.78
51	2.44	1.26	23.09	17.4

Было проведено сравнительное исследование микроструктуры образцов с помощью растровой электронной и оптической микроскопии до и после обработки сильноточными электронными пучками. При исследовании конденсированных многокомпонентных ионно-плазменных покрытий до и после облучения было установлено, что покрытия - многослойные и имеют различное строение в зависимости от его состава. После обработки поверхности образцов сильноточными электронными пучками наблюдается изменение микроструктуры поверхностных слоев покрытий в сравнении с исходными образцами. Измененный (модифицированный) слой представляет собой слабо травящийся поверхностный слой глубиной до 3 – 5 мкм.

Анализ полученных данных показал, что и микротвердость основного материала и слоев покрытий, контактирующих с подложкой, осталась неизменной.

Сравнительный анализ значений микротвердости поверхностных слоев до и после модификации поверхности показал снижение микротвердости поверхностного слоя покрытия в границах модифицированного слоя после облучения сильноточными электронными пучками, что связано с формированием остаточных растягивающих напряжений после проведения обработки СИЭП.

Однако следует заметить, что данное снижение составляет не более 15% в зависимости от композиции покрытия.

Незначительное снижение или увеличение значений микротвердости внутренних слоев покрытий связано с неоднородностью фазового и химического состава в границах каждого подслоя.

Исследования микроструктуры покрытий показали, что в исходном состоянии покрытия имеют структуру, состоящую из фаз  $\beta$  - NiAl и  $\gamma'$  - Ni<sub>3</sub>Al.

Для образца с покрытием ВСП-4 + ВСП-16 внешний слой представляет собой зерна  $\beta$ -фазы, а внутренний слой состоит из зерен  $\beta$ -фазы, по границам которой наблюдаются частицы  $\gamma'$ -фазы. Внешний край покрытия имеет пористую структуру.

Для образцов с покрытиями СДП-2 + ВСП-16 и ВСП-3+ВСП-16 внешний слой представляет собой зерна  $\beta$ -фазы, по границам которых присутствуют частицы  $\gamma'$ -фазы. Внутренний слой состоит из зерен  $\beta$ - и  $\gamma'$ -фаз. Внешний край покрытий имеет слоистую структуру и наличие несплошностей между слоями.

После облучения сильноточными электронными пучками микроструктура поверхностного слоя глубиной до 5 мкм представлена, в основном,  $\beta$ -фазой, слой – однородный, не имеет дефектов в виде пор, слоистости с несплошностями отсутствуют (рис. 1).

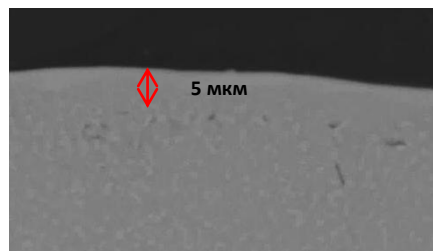


Рис. 1. Микроструктура модифицированного слоя и подслоев покрытия СДП2+ВСП 16 после облучения по режиму  $E=25$  кэВ,  $N=10$  импульсов.

Исследование микроструктуры образцов методом растровой электронной микроскопии, облученных по режиму 4 и 5, подтвердило предположение, что наличие микротрещин связано с технологическими дефектами, образовавшимися при нанесении покрытий.

Исследование элементного состава, как поверхностных слоев покрытия, так и подслоев до и после облучения проводилось с помощью микро-рентгеноспектрального анализа (МРСА). Особый интерес представляло исследование поверхностных слоев покрытия до 5 мкм (в границах модифицированного слоя), так как элементный состав подслоев практически одинаков до и после облучения.

Элементный состав в поверхностном слое до облучения неоднороден и имеет следующий состав на глубине до 5 мкм:

1) для композиции покрытия 1: наблюдается наличие участков как с элементарным составом 18,0% Al – 49,9%Cr – 32,0% Ni, так имеется участки состава 31,9% Al – 18,7%Cr – 66,4% Ni;

2) в поверхностном слое имеются участки с элементным составом 33,9% Al – 2,9%Cr – 63% Ni; 31% Al – 14,6%Cr – 49,8% Ni, а также 17% Al – 32,2%Cr – 38,8% Ni,

3) для композиции 3: на протяжении поверхностного слоя также наблюдаются участки различного состава (32,6% Al – 5,8%Cr – 60,5% Ni; 33,9% Al – 0,82%Cr – 65,3% Ni). Как видно из полученных данных, облучение с помощью высокоэнергетических электронных пучков позволило получить однородный состав поверхностного слоя.

При исследовании элементного состава модифицированного слоя (после облучения СИЭП) всех композиций с помощью рентгеноспектрального анализа (МРСА) установлено, что химический состав на данном участке покрытия однороден и имеет следующий состав: 1) для композиции 1 – 24,2% Al – 16,4%Cr – 59,3% Ni; 2) для композиции 2 – 29,6% Al – 17,3%Cr – 55,6% Ni, 3) для композиции 3 – 23,06% Al – 11,7%Cr – 53,1% Ni.

### Заключение

Анализируя все вышеуказанные данные исследований можно сделать предварительный вывод, что предпочтение можно отдать режиму облучения 4:  $E=25$  кэВ,  $N=10$ , и следует провести облучение по данному режиму образцов с 2-мя другими композициями покрытий по данному ре-

жиму. Однако необходимо провести дополнительные исследования по отработке режимов облучения, включающих варьирование не только значениями энергии электронов и числа импульсов, но и плотности энергии пучка. Также необходимо проведение анализа стабильности модифицированного покрытия при испытаниях на жаростойкость и сопротивление солевой коррозии, имитирующих условия эксплуатации.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-97046 - р\_поволжье\_а, Министерства образования и науки РФ).

### Список литературы

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий переработки на период до 2030 г. // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий. // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 19–36.
3. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001. 632 с.
4. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010. № 3. С. 37–40.

## INFLUENCE OF INTENSIVE ELECTRONIC BUNCHES ON SURFACE LAYERS OF MODERN HEAT RESISTING NICKEL ALLOYS WITH ION-PLASMA COVERINGS OF DIFFERENT STRUCTURE

O.A. Bytsenko<sup>1)</sup>, E.V. Filonova<sup>1)</sup>, A.B. Markov<sup>2)</sup>, N.A. Belova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Research Institute of Aviation Materials" State Research Center of Russia (FSUE VIAM), 105005, Russian Federation, Street Radio, 17, Moscow, Russia, oksiwear@yandex.ru*

<sup>2)</sup>*Institute of High Current Electronics SB RAS, 634055, Russian Federation, Academic Ave, 2/3, Tomsk, Russia, almar@lve.hcei.tsc.ru*

With use of complex of metal physical analysis of research researches of physical and chemical and structural and phase conditions of surface layer before modifying by means of radiation by high-current electronic bunches of samples with the heat resisting condensed ion-plasma coverings of three different compositions put on them on 5 chosen modes are conducted at variation values of energy of electrons and number of impulses. The analysis of the received has shown considerably decrease in surface roughness in 1.7 – 2.2 times, forming of the modified layer up to 5 microns in depth, the microstructure and which element structure considerably differs from initial condition of surface layer: after radiation by high-current electronic bunches the surface layer microstructure, to 5 мкм is provided by depth, generally beta phase, the surface layer after radiation – uniform, has no defects in the form of time, lamination with lack of adhesions; at research of element structure of the modified layer (after SIEP radiation) all to composition by means of the X-ray-structural microanalysis it is established that chemical composition on this site of covering is uniform.